

直線集束ビーム超音波顕微鏡による光導波型デバイス作製プロセスの評価法に関する研究

著者	宮下 雅仁
号	2600
発行年	2000
URL	http://hdl.handle.net/10097/7873

氏 名	みやした まさひと 宮 下 雅 仁
授 与 学 位	博士 (工学)
学 位 授 与 年 月 日	平成 13 年 3 月 26 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電気・通信工学専攻
学 位 論 文 題 目	直線集束ビーム超音波顕微鏡による光導波型 デバイス作製プロセスの評価法に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 櫛引 淳一
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 櫛引 淳一 東北大学教授 中村 僖良 東北大学教授 伊藤 弘昌

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒論

近年、光情報通信や光記録の分野において、光学的特性に優れた LiNbO_3 や LiTaO_3 単結晶を用いた、変調・復調器、スイッチ、結合器、フィルター、短波長光源などの光導波型デバイスの研究・開発が活発に進められている。作製されたデバイスの動作特性や光学特性は、作製プロセスの条件に依存するため、従来、プリズムカプラ法や二次イオン質量分析 (SIMS) 法などの方法により、その物理的、化学的、あるいは光学的特性の評価が行なわれている。これらのデバイスの将来の実用化における課題のひとつとして、大口径ウェハを用いるマス・プロダクションに最適な作製プロセスおよび作製システムの開発・構築が挙げられる。そのためには、作製プロセスや作製システムを評価して、その結果をフィードバックし、そのプロセスやシステムを改良する必要がある。しかし、従来法には、試料の破壊を伴う、定量性に欠ける、あるいは測定精度が充分でないなどの問題があり、それらの改良だけでなく、非破壊的、定量的、かつ高精度な新しい評価法が必要と考える。

直線集束ビーム (LFB) 超音波顕微鏡は、水／試料境界面上を伝搬する漏洩弾性表面波 (LSAW) の伝搬特性 (位相速度・伝搬減衰) を測定することにより、試料の弾性特性を高精度に定量的に評価・解析できるシステムである。本システムは、非破壊・非接触的に測定できる、結晶学的・弾性的異方性を反映した測定ができる、比較的微小な領域に対する測定を広範囲に行なえるなどの特徴を有している。本研究は、光導波型デバイスの作製プロセスおよび作製システムの評価のための新しい技術として、LFB 超音波顕微鏡を提案し、その評価法の確立を目的として行なったものである。本研究では、 LiTaO_3 を用いたプロトン交換光導波路および分極反転層を取り上げ、それらの作製プロセスおよび作製システムの評価法の確立に重点をおいた。

第 2 章 直線集束ビーム超音波顕微鏡システム

本章では、本研究で用いた LFB 超音波顕微鏡システムに関して LSAW 伝搬特性の測定原理、解析法、およびシステムの構成について述べた。また、本研究で用いる試料の構造モデルとして圧電性薄膜／圧電性基板構造を取り上げ、LSAW 伝搬特性の数値解析法を示した。同解析法を、理想的な分極反転層を有する Z-cut

LiTaO₃ 構造に適用した結果、LSAW 伝搬特性は超音波周波数 f と分極反転層の深さ H の積 fH に依存して分散性を示すことを明らかにした。さらに、粒子変位およびポテンシャルのフィールド分布の数値計算を行ない、弾性表面波に対する検討結果と同様に、LSAW 伝搬特性の分散性が、分極反転層と基板との境界付近における電氣的な短絡効果によって生じることを示した。

第3章 プロトン交換 LiTaO₃ の漏洩弾性表面波伝搬特性の測定

本章では、評価法の検討に必要な音響的基礎データを得ることを目的として系統的な実験を行なった。

LiTaO₃ に対するプロトン交換光導波路作製プロセスにおいて、ピロりん酸を用いて、処理時間および処理温度をパラメータとしてプロトン交換した Z-cut LiTaO₃ 試料、およびプロトン交換後の光の伝搬損失を低減させるためのアニーリングプロセスにおいて、処理時間を変えてアニーリング処理した Z-cut LiTaO₃ 試料を作製した。これらの試料に対する LSAW 速度の伝搬方向依存性の測定結果から、LSAW 速度はプロトン交換によって低下し、さらにアニーリング処理すると上昇・回復すること、処理条件の評価には結晶 Y 軸方向伝搬が最適であることを示した。また、LSAW 速度は、プロトン交換およびアニーリング処理における処理条件を反映した分散性を示すことを実験的に明らかにした。さらに、LiTaO₃ プロトン交換層における音響特性を明らかにするために、Z-cut 基板の他に、ピロりん酸中でプロトン交換した X-cut、Y-cut、36° rotated Y-cut、および 128° rotated Y-cut LiTaO₃ 試料を作製し、いずれのカット面基板においても LSAW 速度が全伝搬方向で低下することを初めて明らかにした。

本章で得られた結果は、プロトン交換光導波路作製プロセスにおける処理条件と LSAW 速度との関係を明らかにするために必要な音響的基礎データとなる。

第4章 プロトン交換 LiTaO₃ に対する二次イオン質量分析

本章では、作製プロセスによる LSAW 速度変化を解釈・説明し、プロセス条件と LSAW 速度との関係の議論に必要な基礎データを得るために、SIMS 法により水素およびリチウムの深さプロファイルの分析を行なった。

まず、SIMS 法の原理、分析装置、および再現性のある分析結果を得るための注意点について述べた。次に、第3章で作製した試料に対して分析を行なった。一例として、図1に処理時間を14分間で一定で処理温度を変えてプロトン交換した Z-cut LiTaO₃ 試料に対する分析結果を示す。プロトン交換により、水素はプロトン交換層領域とバルク基板領域の境界まで入り、リチウムはプロトン交換層領域で減少しており、処理時間が長いほど、処理温度が高いほどより深いプロトン交換層が形成されている。プロトン交換後さらにアニーリング処理すると、水素は基板のさらに深いところへ、リチウムは表面へ向かってそれぞれ拡散し、表面付近の水素濃度は低下し、リチウム濃度は上昇・回復することを示した。これらのプロファイルから、プロトン交換層／拡散層の深さを求めた。また、プロトン交換プロセスにおいて、プロトン交換層深さ H と処理時間 t および拡散係数 $D(T)$ との間に式(1)が成り立つことを示した。

$$H = 2\sqrt{t \cdot D(T)} \quad (1)$$

ここで、 T は処理温度である。さらに、 $D(T)$ と T の間に式(2)が成り立つことを示し、 D_0 および Q の値をそれぞれ $4.00 \times 10^9 \mu\text{m}^2/\text{h}$ および 105.7 kJ と求めた。

$$D(T) = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (2)$$

また、プロトン交換した各種カット面 LiTaO₃ 試料に対する分析結果から、水素およびリチウムの拡散係数はカット面に依存して異なることを示した。

本章で得られた結果は、LSAW速度と作製プロセス条件とを関連づけ、作製プロセス条件に依存したLSAW速度の変化を解釈・説明するための非常に重要な基礎データである。

第5章 光導波型デバイス作製プロセスおよび作製システムの評価

本章では、第3章で得られた音響的基礎データと、第4章でSIMS法によって得られた基礎データを用いて、評価法に関して詳細な検討を行なった。

層状構造試料におけるLSAW伝搬特性の fH 依存性を得ることは層状構造の解析や評価に重要である。そこで、第3章で処理条件を変えて作製した複数のプロトン交換Z-cut LiTaO₃試料に対して、LSAW速度の周波数依存性の測定結果とプロトン交換層の深さとを用いてLSAW速度の fH 依存性を作成した。一例として、処理時間を14分間で一定とし処理温度を変えて作製した試料に対する結果を図2に示す。処理時間および処理温度を変えて作製した試料のいずれにおいても、LSAW速度は fH に比例して低下し、その勾配は等しく、同一直線上に互いに重なり合うことを示した。全試料に対する近似直線は次式で与えられる。

$$\Delta V_{\text{LSAW}} = -0.783fH - 4.72 \quad \text{m/s} \quad (3)$$

これより、 f 一定でLSAW速度を測定することによりプロトン交換層深さ H を評価することができる。さらに、式(3)と第4章で得られた式(1)および式(2)とを関連づけることにより、LSAW速度と処理時間、処理温度、および拡散係数との関係を得ることができる。一例として、図3(a)および(b)に $f=225$ MHzにおけるLSAW速度とそれぞれプロトン交換層深さおよび処理温度との関係を示す。図中の○、△、□、および★はそれぞれ220℃、240℃、260℃、および280℃でプロトン交換した試料に対する測定結果を示す。実線は式(1)~(3)を用いて計算した結果である。測定値は計算結果と良く一致している。これらの関係から、LSAW速度はプロトン交換層深さに比例して低下し、プロセス条件を反映して変化することが明らかとなった。LSAW速度のプロトン交換層深さおよび処理温度に対する分解能が、それぞれ ± 0.6 nm および ± 0.06 ℃であり、従来法と比較して極めて高いことを示した。また、さらにアニーリング処理した試料におけるLSAW速度の fH 依存性の勾配が試料中の水素およびリチウム濃度に依存して変化することを示した。

次に、プロトン交換試料の作製システムに対してプロセス条件の均一性評価のシミュレーション実験を行なった。サイズの異なる3種類のピーカー中で2-inch Z-cut LiTaO₃ ウェハの全面をそれぞれプロトン交換した試料に対して超音波周波数一定の条件下でLSAW速度分布の測定を行なった。その分布の主たる要因が温度分布であることを示し、LSAW速度分布から見積もった処理温度分布と、各ピーカー中で測定した酸の温度分布とを比較・検討した結果、LSAW速度分布は、他の評価法では得られない作製システムに固有の実際の処理温度分布を忠実に反映していることを示した。

最後に、プロトン交換および熱処理によって、分極反転層を有するZ-cut LiTaO₃試料を作製し、分極反転層およびその作製プロセスの評価法に関して実験的な検討を行なった。試料の作製において、その両面に対して同一のプロセスをすることを踏まえて、-Z面および+Z面に対してそれぞれ測定されたLSAW速度の差をとることによって、分極反転層が-Z面に形成されたことによって生じる本質的なLSAW速度の分散特性を抽出する方法を提案した。また、抽出されたLSAW速度と分極反転層の深さ、熱処理時間、熱処理温度、および拡散係数との関係を実験的に明らかにし、分極反転層深さおよび熱処理温度に対する分解能がそれぞれ ± 7 nm および ± 0.07 ℃と極めて高い分解能を持ち、他の評価法では得られないLSAW速度分布から熱処理時のプロセス条件の分布を評価できることを示した。

本章では、LFB超音波顕微鏡によるプロトン交換光導波路／分極反転層の作製プロセスおよび作製システムの評価法を提案し、その有用性を示した。

第6章 結論

本研究で得られた成果は、LFB 超音波顕微鏡による、 LiTaO_3 単結晶に対するプロトン交換法をベースとした光導波型デバイス作製プロセスおよび作製システムの評価において必要不可欠な基礎データである。本評価法の特徴は、拡散特性と LSAW 速度の fH 依存性を用いて、LSAW 速度と作製プロセス条件との関係を求める点にある。したがって、Ti 拡散光導波路や半導体デバイスにおけるイオン注入など、拡散現象を利用して作製される全ての層状構造デバイスの作製プロセスおよび作製システム評価への応用が期待できる。本研究が、光導波型デバイスを始めとするさまざまな層状構造デバイスの研究・開発および実用化などにおける産業的、学問的問題解決の一助となれば幸いである。

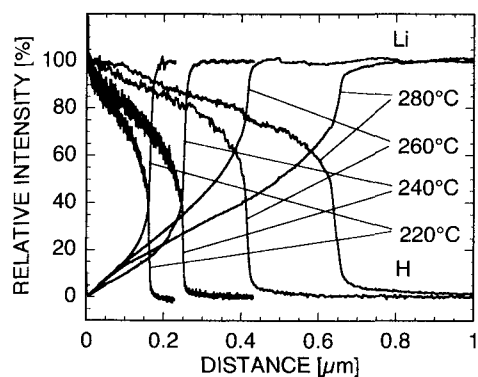


図1 処理温度を変えて14分間プロトン交換したZ-cut LiTaO_3 試料に対するSIMSによる水素およびリチウムの深さプロファイル

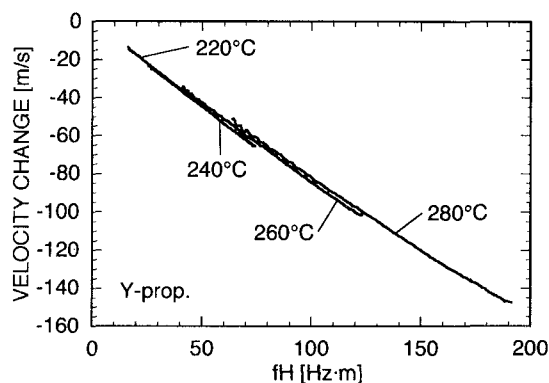
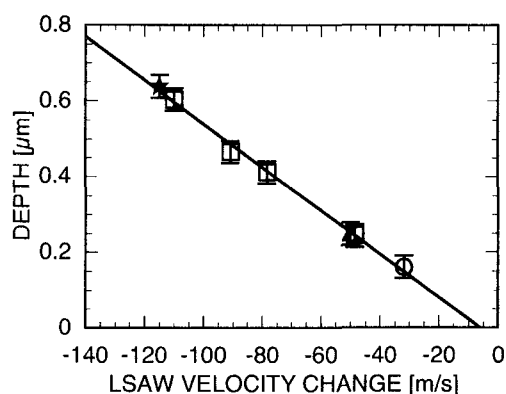
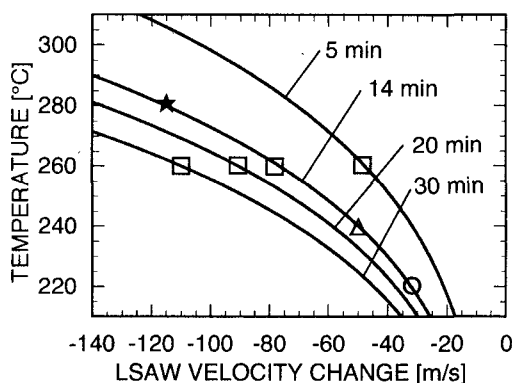


図2 処理温度を変えて14分間プロトン交換したZ-cut LiTaO_3 試料におけるLSAW速度の fH 依存性



(a) LSAW 速度とプロトン交換層深さとの関係



(b) LSAW 速度と処理温度との関係

図3 プロトン交換したZ-cut LiTaO_3 試料におけるLSAW速度とプロトン交換層深さおよび処理時間との関係

論文審査結果の要旨

光情報通信の分野においては、 LiNbO_3 や LiTaO_3 強誘電体単結晶基板を用いた、変調・復調器、スイッチ、フィルタ、短波長光源などのさまざまな導波型光デバイスの研究・開発が盛んに進められている。これらのデバイスの動作特性はその作製プロセスの条件に依存する。その実用化に向けた重要課題の一つとして、マスプロダクションに最適な作製プロセス条件の設定および作製システムの開発が挙げられる。そのためには、作製プロセス条件および作製システムを評価し、その結果をフィードバックして、そのプロセスおよびシステムを改良する必要がある。著者は、そのための新しい解析・評価技術として直線集束ビーム(LFB)超音波顕微鏡が有用と考え、その評価法の確立を目指して研究を行った。本論文はその成果をまとめたもので、全編6章からなる。

第1章は緒論であり、本研究の背景と目的について述べている。

第2章では、LFB 超音波顕微鏡システムの計測の原理、およびそのシステムについて述べている。また、本研究で取り扱う試料のモデルとして水／圧電薄膜層／圧電基板構造を取り上げ、同構造における漏波弾性表面波(LSAW)伝搬特性の数値解析を行っている。

第3章では、評価法の検討に必要な音響的基礎データを得るために行った系統的实验について詳述している。 LiTaO_3 基板に対して光導波路を作製するためのプロセスとしてピロ磷酸を用いたプロトン交換法を取り上げ、その作製条件(温度、時間)を変えて作製した多数の試料に対して LSAW 速度の測定を行っている。その結果、その伝搬方向依存性と周波数依存性、プロトン交換による速度の大きな低下、熱処理による速度の上昇・回復などを明らかにし、また、作製プロセス条件の評価に最適な伝搬方向を見いだしている。これらは重要な成果である。

第4章では、LSAW 速度と作製プロセス条件との対応関係について検討するために、第3章で用いた LiTaO_3 試料に対して、二次イオン質量分析法により水素およびリチウムの深さ方向プロファイルと光導波路の実効的深さを求め、LSAW 速度の変化を解釈・説明するための非常に重要な基礎データを得ている。

第5章では、第3章および第4章で得られた実験結果をもとに、導波型光デバイスの作製プロセス条件の評価法に関する詳細な検討を行っている。その結果、プロトン交換法による光導波路や急速熱処理による分極反転層の深さ、処理温度・時間など作製プロセス条件を評価する方法を開発し、従来法よりも簡便かつ高精度で評価できることを立証している。さらに、プロトン交換層作製システムのプロセスの均一性についてシミュレーション実験を行い、その有用性を実証している。これらの研究成果は極めて高く評価できる。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、LFB 超音波顕微鏡による導波型光デバイス作製プロセス条件および作製システムの評価法を開発・確立したもので、超音波計測学、電気電子材料工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。